

Tempo di esposizione in funzione della magnitudine e diametro del telescopio

Ulisse Munari

INAF, INAF, Istituto Nazionale di Astrofisica,
Osservatorio Astronomico di Padova, sede di Asiago

Riassunto. *In questo rapporto, a partire dalle osservazioni ANS piú precise, viene derivato il tempo di esposizione raccomandato in funzione della magnitudine della variabile e del diametro del telescopio utilizzato. Questi tempi tengono già conto di ottenere un buon rapporto segnale rumore anche sulle stelle standard piú deboli mediamente usate attorno alle simbiotiche (per queste osservazioni ANS piú precise sono state usate mediamente 8.5 stelle di confronto, e mai un numero inferiore a 7). Esporre per questi tempi indicati dovrebbe già portare vicino al raggiungimento del traguardo di un total error budget minore di 0.012 mag (a patto che non vi siano grossi altri problemi, come forme strane dell'immagine, prossimitá della Luna, cattiva correzione per flat, etc.). Se in qualche caso le stelle della sequenza sono piú deboli che nella media degli altri casi, i tempi di posa indicati in questo documento andranno aumentati di conseguenza.*

Tempo di posa totale

I dati raccolti dai telescopi di 30 cm di diametro ed f/10 di apertura R030, R036 e R157 sono tra quelli che hanno fornito in questi anni i dati con gli errori calcolati piú bassi e la minor dispersione attorno alle curve di luce medie derivate. Questo fa ritenere che i tempi di posa adottati da questi telescopi siano una buona scelta di base per telescopi di analoga apertura per raggiungere l'obiettivo di un *total error budget* inferiore a 0.012 mag, uno degli obiettivi posti per il Data Dump 2012. Chiaramente, non basta solo il tempo di esposizione lungo, anche tutti gli altri aspetti dell'osservazione e della riduzione dati contribuiscono alla qualità del risultato finale. Qui ci focalizziamo sul solo tempo di posa, immaginando che tutte le parti della acquisizione e riduzione dati siano fatte bene (ed inoltre non ci siano problemi particolari quali forme strane dell'immagine stellare, prossimitá in cielo della Luna, cattiva correzione per flat, etc.).

Le osservazioni ottenute con i telescopi R030, R036 e R157 sono state suddivise in intervalli di 0.5 mag in funzione della brillantezza della variabile, e per ciascun intervallo e' stato calcolato il valore della mediana. Questi valori della mediana sono stati pesati per il numero di misure e il tutto e' stato fittato con un polinomio di Lagrange del VI ordine per ottenere una distribuzione smussata. I risultati sono riportati nella tabella piú sotto alla voce "30 cm" e sono stati arrotondati ai 10 secondi piú vicini. Poiche' non e' stato applicato alcun filtro sui dati in entrata circa l'altezza dell'oggetto sull'orizzonte, la luminosita' del fondo cielo, la fase della Luna, il seeing, la brillantezza delle stelle di confronto, etc. i dati della Tabella sono da interpretare come i valori raccomandati per un telescopio da 30 cm e condizioni osservative tipiche quando il telescopio da 30 cm espone su simbiotiche fornite delle sequenze fotometriche di Henden & Munari (2000, 2001, 2006) in uso in ANS Collaboration. Questi tempi tengono già conto di ottenere un buon rapporto segnale rumore anche sulle stelle standard piú deboli mediamente usate attorno alle simbiotiche (per queste osservazioni ANS piú precise sono state usate mediamente 8.5 stelle di confronto, e mai un numero inferiore a 7). Se in qualche caso le stelle della sequenza sono piú deboli che nella media degli altri casi, i tempi di posa indicati in questo documento andranno aumentati di conseguenza.

Come si vede, alle magnitudini piú brillanti, la decrescita del tempo di posa é piú lenta di quello che ci si aspetterebbe applicando la legge di Pogson. Questo ha due ragioni: (1) alle magnitudini piú brillanti, é piú il tempo che si impiega a spostarsi sull'oggetto, centrarlo

etc., che quello impiegato ad esporre. Non ha quindi senso perdere 5 minuti per puntare il nuovo oggetto ed esporre per solo 1 minuto per banda. Meglio in questo caso abbondare nella posa e portare a casa un punto dai conteggi gagliardi; (2) l'oggetto può essere anche brillantissimo, ma è improbabile che li attorno ci siano standard egualmente brillanti, e sono in questo caso le standard assai più deboli della variabile che richiedono di tenere "lungo" il tempo di posa. Le scelte fatte dai telescopi R030, R036 e R157 si sono quasi invariabilmente mostrate corrette anche sulle stelle più brillanti, e vale quindi la pena di seguirle.

Nelle altre tabelle, per comodità di utilizzo, sono presentati i tempi di posa raccomandati per gli altri diametri di telescopio presenti in ANS Collaboration, calcolati a partire da quelli per un 30cm e supponendo che tutti i telescopi abbiano una simile ostruzione da parte del secondario e che la luminosità del fondo cielo sia accettabilmente simile un po' per tutti. Mi è difficile proporre una tabella equivalente per i diametri 13 e 15 cm a lente partendo dalla configurazione Cassegrain f/10 dei 30cm presi a modello. Nella configurazione a lente si guadagna sull'assenza di riflessioni e sull'assenza del secondario, ma il rapporto focale più veloce penalizza sulla luminosità del fondo cielo, etc. Sicuramente possiamo dire che il tempo di posa per un 13 ed un 15 cm a lente è più lungo di quanto indicato per il 20cm. Di quanto più lungo a dirlo sarà la capacità di centrare con margine l'obbiettivo di avere il total error budget inferiore a 0.012 mag, con almeno 7 stelle osservate per la sequenza di confronto e ben distribuite in colore a cavallo della variabile.

Suddivisione del tempo totale in più pose

Quello indicato nelle tabelle di questo documento è il tempo di esposizione *totale* raccomandato per la data banda. Normalmente, questo tempo di posa viene suddiviso in pose più brevi, poi registrate astrometricamente e sommate assieme prima di analizzarle. Attenzione però a non suddividere il totale in troppe pose. Questo abbassa (e di parecchio) il rapporto segnale/rumore dell'osservazione.

Infatti, il rapporto segnale-rumore della misura su una stella (che sia la variabile o una stella della sequenza) è dato da:

$$\frac{S}{N} = \frac{QF_{\text{star}}t}{\sqrt{QF_{\text{star}}t + n_{\text{pix}} \left(1 + \frac{n_{\text{pix}}}{n_{\text{B}}}\right) (QF_{\text{sky}}t + F_{\text{dark}}t + \text{RON}^2 + 0.085G^2)}} \quad (1)$$

dove F_{star} , F_{sky} e F_{dark} sono il flusso dalla stella, quello dal cielo, e quello della dark, Q l'efficienza quantica totale del sistema ottico+CCD, n_{pix} il numero di pixel sul quale si estende l'apertura (area) di misura fotometrica, n_{B} il numero di pixels sul quale è calcolato il cielo (sostanzialmente il numero di pixel entro l'anello di stima del cielo, usualmente molto più grande di n_{pix}), RON è il read-out-noise del CCD e G il fattore di conversione ADU del CCD. Se la posa viene divisa in N sottopose, ciascuna di durata t_N eguale (così che $t = Nt_N$), la formula sopra diviene

$$\frac{S}{N} = \frac{QF_{\text{star}}t}{\sqrt{QF_{\text{star}}t + n_{\text{pix}} \left(1 + \frac{n_{\text{pix}}}{n_{\text{B}}}\right) (QF_{\text{sky}}t + F_{\text{dark}}t + N \text{RON}^2 + 0.085G^2)}} \quad (2)$$

dalla quale è facile vedere che al crescere di N si abbassa il S/N. Accade sostanzialmente che ad ogni lettura, ogni pixel del CCD accumula un errore di RON elettroni che vanno a sommarsi agli altri errori.

È quindi preferibile attivare una autoguida e suddividere la posa totale in 4-6 pose individuali. Se il CCD permette diverse velocità di lettura, quelle più lente sono generalmente caratterizzate da RON bassi. As es., sia all'1.22m che al 1.82m di Asiago, pur potendo leggere l'intero CCD in soli 5 secondi, il tempo di lettura che normalmente usiamo è di 140 secondi (2 minuti e 20 sec) per ciascuna immagine.

Facciamo un calcolo esemplificativo. Ora, il flusso fuori atmosfera di una stella di magnitudine $V=0.0$ è di $3.69 \cdot 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ a 5350 \AA (questa sarebbe l'energia (espressa in erg) della radiazione compresa entro un intervallo di 1 \AA attorno al picco di trasmissione della banda V (5350 \AA per una stella di tipo spettrale A) che in un secondo attraversa una superficie di 1 cm quadrato posta ortogonale alla radiazione incidente). Poiché un fotone

di lunghezza d'onda 5350 Å trasporta l'energia di $h\nu = 3.72 \cdot 10^{-12}$ erg (h e' la costante di Plank, ν la frequenza della radiazione), da una stella di tipo spettrale A e di magnitudine $V=0.0$ arrivano per centimetro quadro fuori atmosfera ed in un secondo circa 992 fotoni di lunghezza d'onda tra 5350 e 5351 Å. La banda V ha una larghezza efficace di 890 Å circa (sarebbe la larghezza di una banda fotometrica *quadrata* di trasmissione costante che lascia passare la stessa energia della banda V , che ben sappiamo non avere una forma quadrata). Quindi, sempre fuori atmosfera e dalla nostra stella A di magnitudine $V=0.0$, in un secondo e attraverso un cm quadro, arrivano 883 000 fotoni entro tutta la banda V . Se la nostra stella e di magnitudine $V=15$, il numero di fotoni scende a $0.883 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Di questi fotoni, ne vanno persi circa il 15% nell'attraversamento di 1 massa d'aria (allo zenith), quindi rimaniamo con $0.750 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ a livello del nostro Osservatorio. Se il nostro telescopio ha un diametro di 30cm e l'ostruzione del secondario e' pari al 20% dell'area, l'area di raccolta efficace e' di 565 cm^2 e quindi entrano nel nostro telescopio 424 fotoni al secondo. Supponiamo di avere uno Schmidt-Cassegrain, quindi con 2 superfici riflettenti ed una lastra correttiva, con una camera CCD che ha quindi una finestra in vetro davanti ed un filtro nella ruota porta-filtri. Se ogni superficie riflettente riflette l'80% dell'incidente, la lastra correttiva e la finestra del CCD lasciano passare ciascuna il 90%, e la trasmissione del filtro V mediata su tutta la banda e' del 55%, l'efficienza delle ottiche e' :

$$eff. = 0.80 \times 0.80 \times 0.90 \times 0.90 \times 0.55 = 28.5\% \quad (3)$$

Quindi dei 424 fotoni entranti l'apertura del telescopio, 121 arrivano al CCD. Se l'efficienza quantica del nostro CCD, mediata sulla curva di trasmissione della banda V e' del 45.5%, il totale dei fotoni rilevati dal nostro CCD per la stella di magnitudine $V=15$ in un secondo di posa e' 55 fotoni. Ora immaginiamo che il dischetto di seeing abbia una FWHM di 3.0 pixels, e che quindi l'area di integrazione del segnale abbia un raggio di 3.0 pixels, pari ad un totale di 28.3 pixels illuminati. Se il seeing ha forma gaussiana, questo equivale a dire che mediamente ogni pixel entro l'apertura di misura rileva 1.89 fotoni al secondo dalla nostra stella di $V=15$ osservata allo zenith.

Riassumendo, abbiamo che da una stella di $V=15$ osservata allo zenith, con un telescopio Schmidt-Cassegrain di 30cm di apertura, 20% di ostruzione centrale, trasmissione complessiva delle ottiche del 28.5%, efficienza quantica del CCD media sulla banda V del 45.5% e una FWHM del dischetto di seeing di 3.0 pixels, rileva in media 1.89 fotoni per secondo su ciascuno 28.5 pixels coperti dalla apertura di integrazione fotometrica. Se la posa totale e' di 1000 secondi, la formula (2) si riscrive come

$$\frac{S}{N} = \frac{55000}{\sqrt{55000 + 28.3 \left(1 + \frac{28.3}{n_B}\right) (0.285 F_{sky} 1000 + F_{dark} 1000 + N RON^2 + 0.085 G^2)}} \quad (4)$$

Se abbiamo un cielo piuttosto buio (19 mag/arcsec^2), una corrente di buio di 1 elettrone per secondo per pixel, un RON di 15 elettroni e $G=2$, arriviamo a

$$\frac{S}{N} = \frac{55000}{\sqrt{55000 + 28.3 \left(1 + \frac{28.3}{n_B}\right) (1381 + 1000 + 225 N + 0.34)}} \quad (5)$$

dove per il calcolo di F_{sky} si e' supposto un rapporto focale $f/10$ e un pixel di 13.5 micron. Se n_B e' molto grande, l'espressione si riduce a

$$\frac{S}{N} \approx \frac{55000}{\sqrt{67382 + 6413 N}} \quad (6)$$

dove, ricordiamo, N e' il numero di sottopose nel quale suddividiamo il totale di 1000 secondi dell'esempio. Con una sola posa da 1000 sec avremmo un $S/N=202$, corrispondente ad un errore Poissoniano di circa 0.005 mag. Se invece dividessimo i 1000 secondi in 20 pose da 50 secondi, scenderemmo a $S/N=124$, ovvero aumenteremmo la componente Poissoniana dell'errore a 0.008 mag. Questo nell'ipotesi ottimistica che tutte le 20 pose risultino identiche e centrate perfettamente sullo stesso pixel. Ció e' evidente non sará a causa del rumore introdotto dal processo di registrazione astrometrica, quindi il vero rumore Poissoniano sará verosimilmente piú grande del 0.008 mag qui stimato.

B	sec	V	sec	R_C	sec	I_C	sec
20 cm							
5.0	440	5.0	160	5.0	120	5.0	220
5.5	510	5.5	200	5.5	160	5.5	260
6.0	570	6.0	270	6.0	200	6.0	290
6.5	640	6.5	350	6.5	250	6.5	310
7.0	710	7.0	400	7.0	290	7.0	330
7.5	780	7.5	430	7.5	330	7.5	370
8.0	840	8.0	440	8.0	380	8.0	410
8.5	910	8.5	480	8.5	440	8.5	460
9.0	980	9.0	540	9.0	500	9.0	510
9.5	1070	9.5	610	9.5	570	9.5	560
10.0	1190	10.0	700	10.0	630	10.0	590
10.5	1330	10.5	800	10.5	680	10.5	630
11.0	1490	11.0	890	11.0	720	11.0	660
11.5	1690	11.5	980	11.5	750	11.5	710
12.0	1920	12.0	1060	12.0	770	12.0	780
12.5	2170	12.5	1130	12.5	800	12.5	890
13.0	2460	13.0	1230	13.0	840	13.0	1080
13.5	2760	13.5	1360	13.5	940	13.5	1390
14.0	3090	14.0	1590	14.0	1120	14.0	1860
14.5	3510	14.5	1960	14.5	1440	14.5	2560
15.0	4110	15.0	2550	15.0	1950	15.0	3540
15.5	5020	15.5	3470	15.5	2750	15.5	4910
16.0	6350	16.0	4850	16.0	3900	16.0	6760
16.5	8090	16.5	6820	16.5	5540	16.5	9190
17.0	10130	17.0	9660	17.0	7730		
17.5	12600	17.5	13480				

25 cm							
5.0	280	5.0	100	5.0	80	5.0	140
5.5	320	5.5	130	5.5	100	5.5	170
6.0	370	6.0	170	6.0	130	6.0	190
6.5	410	6.5	220	6.5	160	6.5	200
7.0	460	7.0	260	7.0	180	7.0	210
7.5	500	7.5	280	7.5	210	7.5	240
8.0	540	8.0	280	8.0	240	8.0	260
8.5	580	8.5	310	8.5	280	8.5	300
9.0	630	9.0	340	9.0	320	9.0	330
9.5	690	9.5	390	9.5	360	9.5	360
10.0	760	10.0	450	10.0	400	10.0	380
10.5	850	10.5	510	10.5	430	10.5	400
11.0	960	11.0	570	11.0	460	11.0	420
11.5	1080	11.5	620	11.5	480	11.5	450
12.0	1230	12.0	680	12.0	490	12.0	500
12.5	1390	12.5	720	12.5	510	12.5	570
13.0	1570	13.0	780	13.0	540	13.0	690
13.5	1770	13.5	870	13.5	600	13.5	890
14.0	1980	14.0	1020	14.0	720	14.0	1190
14.5	2240	14.5	1250	14.5	920	14.5	1640
15.0	2630	15.0	1630	15.0	1250	15.0	2270
15.5	3210	15.5	2220	15.5	1760	15.5	3140
16.0	4060	16.0	3100	16.0	2500	16.0	4320
16.5	5180	16.5	4360	16.5	3550	16.5	5880
17.0	6490	17.0	6180	17.0	4940		
17.5	8060	17.5	8630				

B	sec	V	sec	R_C	sec	I_C	sec
-----	-----	-----	-----	-------	-----	-------	-----

30 cm

5.0	190	5.0	70	5.0	50	5.0	100
5.5	230	5.5	90	5.5	70	5.5	120
6.0	260	6.0	120	6.0	90	6.0	130
6.5	290	6.5	150	6.5	110	6.5	140
7.0	320	7.0	180	7.0	130	7.0	150
7.5	350	7.5	190	7.5	150	7.5	170
8.0	370	8.0	200	8.0	170	8.0	180
8.5	400	8.5	210	8.5	200	8.5	210
9.0	440	9.0	240	9.0	220	9.0	230
9.5	480	9.5	270	9.5	250	9.5	250
10.0	530	10.0	310	10.0	280	10.0	260
10.5	590	10.5	360	10.5	300	10.5	280
11.0	660	11.0	400	11.0	320	11.0	300
11.5	750	11.5	430	11.5	330	11.5	320
12.0	850	12.0	470	12.0	340	12.0	350
12.5	970	12.5	500	12.5	350	12.5	400
13.0	1090	13.0	550	13.0	370	13.0	480
13.5	1230	13.5	610	13.5	420	13.5	620
14.0	1380	14.0	710	14.0	500	14.0	830
14.5	1560	14.5	870	14.5	640	14.5	1140
15.0	1830	15.0	1130	15.0	870	15.0	1580
15.5	2230	15.5	1540	15.5	1220	15.5	2180
16.0	2820	16.0	2160	16.0	1730	16.0	3000
16.5	3600	16.5	3030	16.5	2460	16.5	4090
17.0	4500	17.0	4300	17.0	3430		
17.5	5600	17.5	5990				

35 cm

5.0	140	5.0	50	5.0	40	5.0	70
5.5	160	5.5	60	5.5	50	5.5	80
6.0	190	6.0	90	6.0	70	6.0	90
6.5	210	6.5	110	6.5	80	6.5	100
7.0	230	7.0	130	7.0	90	7.0	110
7.5	250	7.5	140	7.5	110	7.5	120
8.0	270	8.0	140	8.0	120	8.0	130
8.5	290	8.5	160	8.5	140	8.5	150
9.0	320	9.0	170	9.0	160	9.0	170
9.5	350	9.5	200	9.5	180	9.5	180
10.0	380	10.0	230	10.0	200	10.0	190
10.5	430	10.5	260	10.5	220	10.5	200
11.0	480	11.0	290	11.0	230	11.0	220
11.5	550	11.5	320	11.5	240	11.5	230
12.0	620	12.0	340	12.0	250	12.0	250
12.5	710	12.5	370	12.5	260	12.5	290
13.0	800	13.0	400	13.0	270	13.0	350
13.5	900	13.5	440	13.5	300	13.5	450
14.0	1000	14.0	510	14.0	360	14.0	600
14.5	1140	14.5	630	14.5	470	14.5	830
15.0	1330	15.0	830	15.0	630	15.0	1150
15.5	1630	15.5	1120	15.5	890	15.5	1590
16.0	2060	16.0	1570	16.0	1270	16.0	2190
16.5	2630	16.5	2210	16.5	1800	16.5	2980
17.0	3290	17.0	3140	17.0	2510		
17.5	4090	17.5	4370				

B	sec	V	sec	R_C	sec	I_C	sec
-----	-----	-----	-----	-------	-----	-------	-----

40 cm

5.0	110	5.0	40	5.0	30	5.0	60
5.5	130	5.5	50	5.5	40	5.5	60
6.0	140	6.0	70	6.0	50	6.0	70
6.5	160	6.5	90	6.5	60	6.5	80
7.0	180	7.0	100	7.0	70	7.0	80
7.5	190	7.5	110	7.5	80	7.5	90
8.0	210	8.0	110	8.0	100	8.0	100
8.5	230	8.5	120	8.5	110	8.5	120
9.0	240	9.0	130	9.0	120	9.0	130
9.5	270	9.5	150	9.5	140	9.5	140
10.0	300	10.0	180	10.0	160	10.0	150
10.5	330	10.5	200	10.5	170	10.5	160
11.0	370	11.0	220	11.0	180	11.0	170
11.5	420	11.5	240	11.5	190	11.5	180
12.0	480	12.0	260	12.0	190	12.0	190
12.5	540	12.5	280	12.5	200	12.5	220
13.0	610	13.0	310	13.0	210	13.0	270
13.5	690	13.5	340	13.5	230	13.5	350
14.0	770	14.0	390	14.0	280	14.0	460
14.5	870	14.5	490	14.5	360	14.5	640
15.0	1020	15.0	630	15.0	490	15.0	880
15.5	1250	15.5	860	15.5	680	15.5	1220
16.0	1580	16.0	1210	16.0	970	16.0	1680
16.5	2010	16.5	1700	16.5	1380	16.5	2290
17.0	2520	17.0	2410	17.0	1920		
17.5	3140	17.5	3350				

50 cm

5.0	70	5.0	30	5.0	20	5.0	40
5.5	80	5.5	30	5.5	30	5.5	40
6.0	90	6.0	40	6.0	30	6.0	50
6.5	100	6.5	60	6.5	40	6.5	50
7.0	110	7.0	60	7.0	50	7.0	50
7.5	120	7.5	70	7.5	50	7.5	60
8.0	130	8.0	70	8.0	60	8.0	70
8.5	150	8.5	80	8.5	70	8.5	70
9.0	160	9.0	90	9.0	80	9.0	80
9.5	170	9.5	100	9.5	90	9.5	90
10.0	190	10.0	110	10.0	100	10.0	100
10.5	210	10.5	130	10.5	110	10.5	100
11.0	240	11.0	140	11.0	120	11.0	110
11.5	270	11.5	160	11.5	120	11.5	110
12.0	310	12.0	170	12.0	120	12.0	120
12.5	350	12.5	180	12.5	130	12.5	140
13.0	390	13.0	200	13.0	130	13.0	170
13.5	440	13.5	220	13.5	150	13.5	220
14.0	500	14.0	250	14.0	180	14.0	300
14.5	560	14.5	310	14.5	230	14.5	410
15.0	660	15.0	410	15.0	310	15.0	570
15.5	800	15.5	550	15.5	440	15.5	790
16.0	1020	16.0	780	16.0	620	16.0	1080
16.5	1290	16.5	1090	16.5	890	16.5	1470
17.0	1620	17.0	1550	17.0	1240		
17.5	2020	17.5	2160				
